

<sup>24</sup> Z.M. de Pedro, J.A. Casas, L.M. Gomez-Sainero, J.J. Rodríguez: *Applied Catalysis B. Environmental*, (2010) 98, 79-85.

<sup>25</sup> A. Alvarez-Montero, L.M. Gomez-Sainero, A. Mayoral, L. Diaz, R.T. Baker, J.J. Rodriguez: *Journal of Catalysis*, (2011) 279, 389-396.

<sup>26</sup> A. Alvarez-Montero, L.M. Gomez-Sainero, J. Juan-Juan, A. Linares-Solano, J.J. Rodriguez: *Chemical Engineering Journal*, (2010) 162, 599-608.

<sup>27</sup> A. Alvarez-Montero, J.J. Rodriguez, L.M. Gomez-Sainero, M. Martin: *Patente Española* (Ref: P200901533).

## Procesos de transformación del Carbón

**M. Carmen Mayoral Gastón**

*CSIC - Instituto de Carboquímica (ICB), Zaragoza*

### 1. Introducción

Los acontecimientos recientes en Japón han reavivado el debate sobre la dependencia de las distintas fuentes de energía. Entre ellas, la opinión pública contempla la obtención de energía eléctrica de carbón como una opción 'sucia' frente a las opciones renovables, pero no cabe duda que el 40% de la energía eléctrica en los países de la OCDE se produce a partir de carbón. Con los datos del escenario actual, y pese a la tendencia a la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, la Oficina Internacional de la Energía (IEA) prevé que el consumo mundial de carbón crecerá significativamente en el futuro próximo, con la vista puesta en 2030 como punto futuro donde los desarrollos de las distintas tecnologías limpias deberían estar en fase de explotación. Los ámbitos de desarrollo transversal considerados en los informes más recientes para todos los procesos de transformación del carbón son tres: mejora de la eficiencia, uso de tecnologías limpias, y captura y almacenamiento de CO<sub>2</sub>. A continuación se describen brevemente la situación actual y las perspectivas de evolución en las tecnologías de conversión de carbón.

### 2. Tecnologías limpias para producción eléctrica

La combustión de carbón pulverizado para la obtención de energía eléctrica y los sistemas de control de emisiones (partículas, SO<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>) se consideran tecnologías maduras. Las centrales convencionales operan en condiciones subcríticas, donde el límite superior de eficiencia ronda el 38%. El desarrollo de esta tecnología se dirige al aumento de eficiencia, mediante la combustión supercrítica e incluso ultra-supercrítica: vapor de agua a 25-30MPa y 620°C, con eficiencias que rondan el 46%. Existen ejemplos de plantas comerciales que operan en estas condiciones pero el objetivo que se plantea en el horizonte temporal de 2030 es conseguir materiales y diseños que aúnen ciclos ultrasupercríticos (30MPa, 700°C) y captura integrada, con eficiencia total 48%. Estos objetivos parecerían indicar que el desarrollo está en manos de la ingeniería, sin embargo la Química realiza su aportación mediante el diseño y evaluación de materiales con resistencia química y mecánica a la corrosión y a la fatiga en estas condiciones extremas. También el control de emisiones de mercurio supone una importante línea de investigación multidisciplinar. Existen soluciones comerciales como la inyección de carbono activo, poco específico para el Hg y que además interfiere en el aprovechamiento de las cenizas. Por ello se trabaja activamente en el desarrollo de dopantes que mejoren la afinidad del sorbente por el Hg, así como en el diseño de sorbentes regenerables. Esta problemática abre también la posibilidad de optimización de unidades de eliminación multicontaminantes, como unidades de desulfuración SO<sub>2</sub>/Hg o de reducción catalítica selectiva NO<sub>x</sub>/Hg.

Por otra parte, la combustión en lecho fluidizado circulante ha evolucionado desde los años 90, con la construcción de numerosas plantas específicas para combustibles 'difíciles', y su desarrollo se dirige a la combustión de biomasa y residuos, con aumento de capacidad y eficiencia.

El proceso de obtención de combustibles gaseosos a partir de carbón requiere una etapa de gasificación en la que se somete al carbón pulverizado a un tratamiento a alta temperatura en defecto de oxígeno. El proceso es utilizado también para biomasa y residuos, pero su implantación a gran escala es en plantas comerciales de gasificación con ciclo combinado integrado, de alta eficiencia, alcanzándose un alto grado de limpieza de gases. Además, la propia tecnología ofrece la posibilidad de capturar el CO<sub>2</sub> en la corriente a presión previamente a la combustión, actualmente en demostración. La limitación principal para su implantación generalizada es del ámbito económico: son plantas que requieren una inversión inicial elevada, y tienen además más problemas operativos que disminuyen su disponibilidad. Las posibilidades de mejora del proceso se encuentran en las operaciones de separación y limpieza de gases. Por una parte, se considera fundamental encontrar alternativas a la costosa separación de aire, y para ello se plantea el desarrollo de membranas de transporte iónico (ITM). Se busca que en el medio plazo este tipo de membranas permita la integración con turbinas optimizadas de hidrógeno. Asimismo, la investigación se dirige a sistemas de ultralimpieza del gas, que permitiera incluso la integración de la gasificación con sistemas de pilas de combustible.

### 3. Carbón para usos industriales.

La industria de la obtención de hierro y acero es el sector que más carbón consume después de la generación eléctrica. Los procesos en alto horno requieren de coque de carbón de alta calidad que a su vez procede de procesos clásicos de coquería. Esta industria avanza hacia el mayor rendimiento energético con mejoras de eficiencia, con nuevos diseños como son la inyección directa de carbón y la instalación de turbinas de recuperación. Lo mismo sucede con la industria del cemento, en la que se considera prioritaria la instalación de diseños optimizados para reducir el gasto energético. Ambos sectores industriales son grandes emisores de CO<sub>2</sub>, por lo que las medidas de optimización energética se consideran igualmente como medidas indirectas de reducción de emisión de CO<sub>2</sub>.

En el apartado de carbón para usos industriales debe incluirse otra industria, que aunque es minoritaria, la tecnología para su implantación está demostrada y es considerada como una opción de gran proyección en el futuro del carbón como materia prima: la obtención de líquidos combustibles y/o monómeros de polimerización mediante los procesos

de licuefacción directa y licuefacción indirecta. Fueron ampliamente estudiados en los 80 y en la actualidad, tanto la licuefacción directa como indirecta se consideran desarrolladas pero de escasa implantación comercial, aunque cuenta con algunos ejemplos muy importantes en países emergentes. Diversos estudios de prospectiva energética la consideran como una gran alternativa a la dependencia del petróleo. El carbón posee mayor contenido en carbono y menor en hidrógeno que el petróleo, por lo que el proceso carbón-a-líquidos requerirá el aporte de  $H_2$  al sistema o la extracción del carbono con producción de corrientes de  $CO_2$  (ver esquemas en Figura 1): es por ello por lo que no se considera económicamente viable si el precio del petróleo se mantiene bajo y estable. Sin embargo, en el panorama energético actual, cobra nueva fuerza la revisión de la tecnología. Esta industria tiene más relación con la petroquímica que con la energética, ya que la importancia del desarrollo de catalizadores y de procesos de separación y purificación será más relevante que en otros usos. La posibilidad de configuración híbrida gasificación/hidrogenación abre nuevas posibilidades de desarrollo para la obtención de combustibles líquidos a partir de carbón, en cualquier caso su implantación tendrá que venir acompañada siempre de las medidas correspondientes de captura.

#### 4. Tecnologías de Captura de $CO_2$

Los procesos descritos anteriormente requieren en todos los casos de la integración de sistemas de captura de  $CO_2$  para que su implantación no redunde en un aumento de las emisiones de  $CO_2$ . Las tecnologías de captura de  $CO_2$  se pueden agrupar en dos grandes categorías. La primera consiste en

sistemas de separación del  $CO_2$  de corrientes de salida de instalaciones convencionales, con tecnologías demostradas como la absorción en aminas. En la actualidad, las distintas plantas instaladas intentan valorar la integración, el escalado, la eficiencia en captura. Sin embargo, es conocida la alta penalización energética de estos procesos, y por ello se estudian otros sustratos líquidos como los basados en amoníaco y líquidos iónicos, así como la posibilidad de separación a alta temperatura en ciclos de carbonatación-descarbonatación en óxidos de calcio, ya en demostración.

La otra gran aproximación a la captura es más radical, y consiste en el desarrollo de nuevos procesos de obtención de combustión en los que el comburente es o bien oxígeno puro parcialmente mezclado con  $CO_2$  procedente del reciclado de los gases de chimenea, (oxicombustión) o bien transportadores sólidos de oxígeno (chemical looping). Las calderas de de oxicombustión se encuentran en fase demostración, sin embargo existen varias vías de optimización de la tecnología. Por una parte, se pueden desarrollar las unidades de obtención de oxígeno, que al igual que en el caso de la gasificación se prevé una futura integración entre membranas de transporte iónico-oxicombustión ultrasupercrítica. Por otro lado, el impacto de las altas temperaturas de combustión y la recirculación de parte del  $CO_2$  requiere la implantación de medidas específicas de limpieza de gases, especialmente para el mercurio. En cuanto al chemical looping (CLC), se encuentra en fase demostración para gas natural. En la actualidad el CLC de carbón sólido está en fase de investigación, especialmente en el desarrollo de nuevos transportadores de oxígeno resistentes a los ciclos.

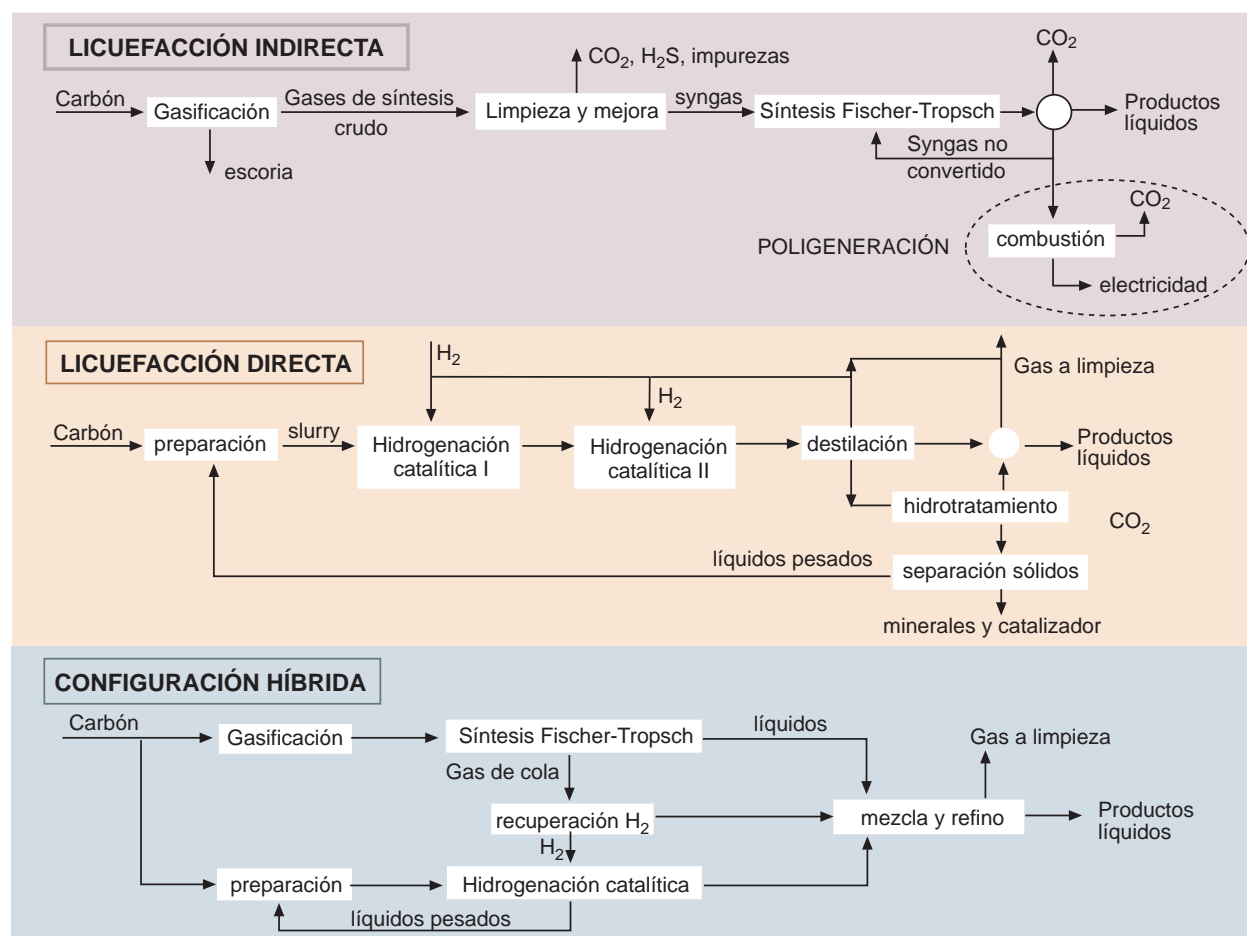


Figura 1. Esquemas de licuefacción indirecta, directa y configuración híbrida.

Un cuadro resumen de las tecnologías de captura de las líneas de investigación se muestra a continuación.

CAPTURA	2011	2030
Post-combustión	Demostración 85% captura -- -- -- -- -- Comercial 95% captura (nuevas plantas)	
	aminas, aminas avanzadas, amoniaco óxidos de calcio	
Separación Pre-combustión	R&D: -- -- -- -- -- Demostración	
	Disolventes físicos: líquidos iónicos... Membranas N <sub>2</sub> /CO <sub>2</sub> : híbridos membrana-aminas, procesos enzimáticos Sorbentes: aminas soportadas, MOFs	
Nuevos conceptos	Demostración en IGCC -- -- -- -- -- captura 85% -- -- -- -- -- Comercial	
	aminas, glicol, metanol	
	R&D: -- -- -- -- -- Demostración	
	Separación: Líquidos iónicos, hidratos, MOFs, membranas Conceptos: Turbinas de H <sub>2</sub> , ciclos integrados con pilas, reactores de membrana	
	Demostración: Oxicombustión con recirculación de CO <sub>2</sub> -- -- -- -- -- demostración supercrítica	
	R&D: emisiones, Hg, materiales Separación aire: piloto membranas, transporte iónico -- -- -- -- -- demostración integración Laboratorio: transportes de oxígeno para carbón -- -- -- -- -- demostración	

Transversal:  
Mejora  
eficiencia,  
disponibilidad  
reducción  
consumo,  
costes...

Figura 2. Evolución prevista en las tecnologías de captura.

## 5. El carbón nos interesa.

Con toda seguridad este breve compendio del estado del arte del uso del carbón resulta incompleto... sin embargo en este apartado tenemos la oportunidad de abrir enlaces a las fuentes más contrastadas donde completar, explorar y entender el extenso mundo del carbón y su importancia en el ámbito de la investigación en Tecnologías Químicas.

En primer lugar, la Agencia Internacional de la Energía mencionada anteriormente tiene una sección dedicada al carbón, el Clean Coal Centre (<http://www.iea-coal.org.uk>). Este organismo tiene como objetivo principal el compendiar el conocimiento sobre el abastecimiento y uso del carbón, para contribuir a la mejora y desarrollo continuado del carbón como fuente de energía limpia. Dentro de sus actividades encontramos cursos, congresos e informes específicos sobre los distintos aspectos del carbón. El Centro ofrece una base de datos abierta (<http://www.coalonline.org>) donde se puede encontrar abundante información libre sobre el carbón. Para aquellos que nos dedicamos al carbón, los informes de la serie CCC (<http://bookshop.iea-coal.org.uk>) son una revisión exhaustiva y objetiva de cada aspecto del carbón, incluyendo siempre una visión técnica y económica realista, así como las perspectivas más avanzadas en investigación. Como ejemplo, aquí van los cinco informes más vendidos por la editorial en el mes de Marzo del presente año:

- IEA-Clean Coal Centre reports: Top sellers for March
1. Public attitudes to coal use in the context of global warming, CCC/177
  2. Chemical looping combustion of coal, CCC/178
  3. Coal-to-oil, gas and chemicals in China, CCC/181
  4. The use of petroleum coke in coal-fired plant, CCC/55
  5. Propensity of coal to self-heat, CCC/172

Figura 3. Los 5 informes IEA-CCT más vendidos en Marzo 2011.

## Reseña Tesis Doctoral

**Título:** Combustión de gases con separación inherente de CO<sub>2</sub> mediante transportadores de oxígeno basados en NiO.

**Doctor que la ha presentado:** Ana Cristina Dueso Villalba

**Director/es de la Tesis:** Juan Adánez Elorza, Francisco García Labiano

**Dirección:** Instituto de Carboquímica (CSIC), Miguel Luesma Castán 4, 50018 Zaragoza.

**E-mail:** [cdueso@icb.csic.es](mailto:cdueso@icb.csic.es)

**Fecha:** 1 de Marzo 2011, Instituto de Carboquímica (CSIC).

Otra fuente muy interesante es la EPRI (Electric Power Research Institute, USA), que es una compañía independiente dedicada a la I+D+i en energía eléctrica, que gestiona un gran número de proyectos de investigación privada e institucional en los Estados Unidos. Los informes son accesibles en muchos casos (<http://my.epri.com>). También en USA, el Departamento (Ministerio) de Energía ofrece gran cantidad de información. Merece la pena recordar que los Estados Unidos son los que más inversión realizan en mejora de eficiencia y mitigación (<http://www.fossil.energy.gov/programs/powersystems/cleancoal>), especialmente en los centros que forman la red National Energy Technology Laboratory. Y por último, ofrecemos el link a la web europea de investigación institucional en energía, donde se pueden encontrar las bases de datos de los proyectos de investigación en carbón, captura y energías alternativas en la red europea ([http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index\\_en.cfm](http://ec.europa.eu/research/energy/eu/index_en.cfm)).

La principal conclusión es evidente:

Existe un gran consenso internacional en la necesidad de resolver la obtención de energía limpia a partir del carbón. La solución no será única: las grandes tecnologías descritas, con desarrollo a medio plazo, tienen que venir acompañadas de progresos a corto plazo en campos relacionados como biomasa y gestión de residuos, nuevos materiales, optimización de la operación y control con simulación e instrumentación avanzadas... La suma de estas medidas puede suponer un descenso porcentual importante en las emisiones de gases de efecto invernadero por el simple aumento en la eficiencia, que al fin y al cabo, es el objetivo más importante en la transformación del carbón en energía y en productos químicos.

La combustión utilizando transportadores de oxígeno (Chemical Looping Combustion, CLC) se ha

convertido en una alternativa muy interesante frente a otros sistemas de captura porque combina la